

Japanese Patent Laid-open No. 2002-36030 A

Publication date : February 5, 2002

Applicant : Mitsutoyo Corp.

Title : Electric Discharge Machine and Electric Discharge Machining Method

5

[0036]

The gate is connected to an electric discharge pulse width controller 38 through an insulated high-frequency matching circuit 40, and switching of the gate is controlled by an electric discharge command pulse from the electric discharge pulse width controller 38. A high-voltage superposed unit 14c increases the voltage with constant gradient at the same start timing in synchronization with a gate drive signal of the pulse voltage generation unit 14b, i.e. the electric discharge command pulse, and the high-voltage superposed unit 14c superposes the voltage on the low voltage +LV (cathode side of a reverse-current protection diode 14d).

[Fig. 1] Fig. 1 depicts an overall configuration of an embodiment of the present invention.

20 Fig. 1

- 10 Direct-current power supply
- 14 Electric discharge pulse power supply
- 14a Filter
- 14b Pulse voltage generation unit
- 25 14c High-voltage superposed unit

Electric discharge machining pulse

- 20 Spindle
- 28 Workpiece
- 5 32 Y-axis positioning device
- 34 X-axis positioning device
- 36 Z-axis positioning device
- 38 Electric discharge pulse width controller
- 10 Positioning command
- Lamp number
- Electric discharge command pulse

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 パルス電圧を電極と被加工物間に印加して放電を生じさせ、前記被加工物を部分的に溶解させることで加工する放電加工機であって、時間とともに電圧が上昇するようなパルス電圧を供給するパルス電源と、放電電流を検出する放電電流検出手段と、放電開始以後の前記放電電流の時間積分値を算出し、前記時間積分値が所定値となるように前記パルス電源を制御する電圧制御手段と、を有することを特徴とする放電加工機。

【請求項 2】 請求項 1 に記載の装置において、さらに、放電開始時間を検出する時間検出手段と、前記放電開始時間に基づいて前記電極と前記被加工物間の放電ギャップをフィードバック制御するギャップ制御手段と、を有し、前記ギャップ制御手段は、前記放電開始時間が適正時間より短い場合には前記放電ギャップを広げ、前記放電開始時間が適正時間より長い場合には前記放電ギャップを狭めることを特徴とする放電加工機。

【請求項 3】 請求項 1 に記載の装置において、さらに、放電開始時の前記パルス電圧を検出するパルス電圧検出手段と、前記放電開始時の前記パルス電圧に基づいて前記電極と前記被加工物間の放電ギャップをフィードバック制御するギャップ制御手段と、を有し、前記ギャップ制御手段は、前記放電開始時の前記パルス電圧が適正電圧より低い場合には前記放電ギャップを広げ、前記放電開始時の前記パルス電圧が適正電圧より高い場合には前記放電ギャップを狭めることを特徴とする放電加工機。

【請求項 4】 請求項 1 に記載の装置において、さらに、放電開始時間を検出する時間検出手段と、を有し、前記電圧制御手段は、前記放電開始時間が所定しきい時間よりも短い場合に前記電極と前記被加工物の短絡状態を検出して前記パルス電圧の供給を停止することを特徴とする放電加工機。

【請求項 5】 請求項 1 ～ 4 のいずれかに記載の装置において、前記パルス電源は、放電パルスを出力するパルス電圧発生部と、前記放電パルスに電圧を重畳する高電圧重畳部と、を有し、前記パルス電圧発生部は、前記時間積分値が所定値に達した時点で前記放電パルスの出力を停止し、前記高電圧重畳部は、前記放電パルスと同期して前記放電パルスに時間とともに上昇する電圧を重畳し、かつ、

放電開始以後に前記重畳を停止することを特徴とする放電加工機。

【請求項 6】 請求項 5 に記載の装置において、前記電圧制御手段は、加工速度指令に基づいて基準パルスを生成する基準パルス生成手段を備え、前記パルス電圧発生部は前記基準パルスに同期して前記放電パルスの出力を開始し、前記高電圧重畳部は前記基準パルスに同期して前記上昇する電圧の重畳を開始することを特徴とする放電加工機。

【請求項 7】 請求項 5、6 のいずれかに記載の装置において、前記電圧制御手段は、前記放電電流を積分する積分器と、前記所定値と前記積分器出力とを比較する比較器と、を更に備え、前記パルス電圧発生部は、前記積分器出力が前記所定値に達したことを示す前記比較器の出力によって前記放電パルスの出力を停止することを特徴とする放電加工機。

【請求項 8】 請求項 5 ～ 7 のいずれかに記載の装置において、前記電圧制御手段は、前記放電電流と所定しきい電流とを比較することにより放電を検出する放電検出手段を更に備え、前記高電圧重畳部は、前記放電検出手段の出力によって前記上昇する電圧の重畳を停止することを特徴とする放電加工機。

【請求項 9】 請求項 8 に記載の装置において、前記放電パルスの出力開始後、前記所定しきい時間以内に前記放電検出手段が放電を開始したことを検出した場合に、前記パルス電圧発生部は前記放電パルスの出力を直ちに停止し、前記高電圧重畳部は前記上昇する電圧の重畳を直ちに停止することを特徴とする放電加工機。

【請求項 10】 請求項 1 ～ 9 のいずれかに記載の装置において、前記放電電流検出手段は、放電点近傍に配置されることを特徴とする放電加工機。

【請求項 11】 請求項 1 ～ 10 のいずれかに記載の装置において、前記放電電流検出手段は、前記電極によりその中心部が貫かれるように配置されたリング状の磁性体コアと、前記磁性体コアに巻回されたコイルと、を有することを特徴とする放電加工機。

【請求項 12】 請求項 11 に記載の装置において、前記磁性体コアには、前記電極を通すための間隙が形成されることを特徴とする放電加工機。

【請求項 13】 パルス電圧を電極と被加工物間に印加

して放電を生じさせ、前記被加工物を部分的に溶解させることで加工する放電加工機における放電加工方法であって、
時間と共に電圧が上昇するようなパルス電圧の供給を開始するパルス電圧供給ステップと、
放電開始を検出する放電開始検出ステップと、
放電開始以後の放電電流を積分する放電電流積分ステップと、
前記放電電流の積分結果を所定値と比較する積分結果比較ステップと、
前記積分結果が前記所定値以上となった場合に、前記パルス電圧の供給を停止するパルス電圧停止ステップと、
を備えることを特徴とする放電加工機における放電加工方法。

【請求項 14】 請求項 13 記載の方法において、さらに、
パルス電圧の供給を開始してから、放電開始までの放電開始時間を測定する放電開始時間測定ステップと、
前記放電開始時間と適正時間とを比較する放電開始適正時間比較ステップと、
前記放電開始時間が適正時間より短い場合には前記電極と前記被加工物間の放電ギャップを広げ、前記放電開始時間が適正時間より長い場合には前記放電ギャップを狭める時間比較放電ギャップ調節ステップと、
を備えることを特徴とする放電加工機における放電加工方法。

【請求項 15】 請求項 13 記載の方法において、さらに、
放電開始時の前記パルス電圧を測定するパルス電圧測定ステップと、
前記放電開始時の前記パルス電圧と適正電圧とを比較するパルス電圧適正電圧比較ステップと、
前記放電開始時の前記パルス電圧が前記適正電圧より低い場合には前記電極と前記被加工物間の放電ギャップを広げ、前記放電開始時の前記パルス電圧が前記適正電圧より高い場合には前記放電ギャップを狭める電圧比較放電ギャップ調節ステップと、
を備えることを特徴とする放電加工機における放電加工方法。

【請求項 16】 請求項 13 記載の方法において、さらに、
パルス電圧の供給を開始してから、放電開始までの放電開始時間を測定する放電開始時間測定ステップと、
前記放電開始時間と所定しきい時間とを比較する所定しきい時間比較ステップと、
を備え、前記放電開始時間が所定しきい時間よりも短い場合に前記電極と前記被加工物の短絡状態を検出して前記パルス電圧停止ステップにおいて前記パルス電圧の供給を停止することを特徴とする放電加工機における放電加工方法。

【請求項 17】 請求項 13～16 のいずれかに記載の方法において、

前記パルス電圧供給ステップは、さらに、
放電パルスを出力する放電パルス出力ステップと、
前記放電パルスに電圧を重ねる高電圧重畳ステップと、
を含み、
前記高電圧重畳ステップは、前記放電パルスと同期して前記放電パルスに時間とともに上昇する電圧を重ねし、
かつ、前記放電開始検出ステップにおいて放電を開始したことを検出した時点で前記重畳を停止する、
ことを特徴とする放電加工機における放電加工方法。

【請求項 18】 請求項 17 に記載の方法において、
前記パルス電圧供給ステップは、さらに、
加工速度指令に基づいて基準パルスを生成する基準パルス生成ステップを備え、前記放電パルス出力ステップは前記基準パルスに同期して前記放電パルスの出力を開始し、
前記高電圧重畳ステップは前記基準パルスに同期して前記上昇する電圧の重畳を開始することを特徴とする放電加工機における放電加工方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は放電加工機及び放電加工方法、特に放電用パルス電圧の制御に関する。

【0002】

【従来の技術】 従来より、電極と被加工物間に形成される放電ギャップにパルス電圧を印加して放電させ、この放電エネルギーを用いて被加工物を部分的に溶解し加工する放電加工機が知られている。従来の放電加工機では、多数の時系列パルスからなる放電電流の時間的平滑値が一定となるように電極と被加工物間の放電ギャップを機械的運動機構により制御している。放電電流検出素子としては、低抵抗または電流トランス等が用いられ、これらは放電パルス電源と直流電源との間を結ぶ給電ワイヤの途中に挿入される。

【0003】

【発明が解決しようとする課題】 しかしながら、低抵抗や電流トランスの周波数特性は良好ではなく、放電電流の変化に追従できない。しかも、低抵抗や電流トランスで検出された信号はフィルタを通して平均化、平滑化されるため、多数の時系列パルスからなる放電電流波形の時間的に平均化された情報しか把握していなかった。検出した放電電流を平均化、平滑化する理由は、放電ギャップを制御する運動機構の応答速度が大変遅く、放電電流の変化に追従できないため、前記運動機構の応答周波数まで放電電流波形を鈍らせてギャップ制御の信号としている。この結果、運動機構の数値制御位置決めデータとしてフィードバックされる情報は、その時点で放電が発生するのに適当な位置の情報ではなく時間的に遅れた情報であり、放電ギャップも放電条件にとってしばしば

適当でない状態となっていた。例えば、放電ギャップが広すぎれば放電しなくなり、その分だけ加工上のロスタイムが生じて生産性の低下を招く。一方、放電ギャップが狭すぎると過度の放電電流が流れて過度の融解痕を被加工物の放電発生表面に残し、加工の品質低下につながる問題があった。

【0004】以下、この点を詳しく説明する。一般に、液中放電加工では、 $I(t)$ ：放電電流（時間の関数）、 T_d ：放電電流持続時間、 V ：放電電圧、 G ：電極と被加工物表面との放電ギャップ、の4つのパラメータが重要である。

【0005】ここで、

【数1】

$$Q = \int I(t) dt$$

はパルス1回当たりの除去量を決定し、 Q の値が増大するほど除去量も大きくなる。そして、この Q の値にパルス発生回数を乗じたものが加工速度となる。また、表面粗さの向上にはきめ細かな放電痕をまんべんなく一様に多数生じさせる方が好ましく、このためにはパルス1回当たりの Q 値の微細化が重要となる。

【0006】また、放電電圧 V と放電ギャップ G は放電の開始条件に関係し、 G が大きくなれば放電を発生させるために要する V も高くなる。但し、 G が大き過ぎる（広過ぎる）と放電は発生せず、小さ過ぎる（狭過ぎる）と短絡状態となり放電は発生しない。一般的には G は $0.1 \mu m \sim$ 数 μm であり、 V は $50V \sim 150V$ 程度である。 G が決めれば V は一つの値をとる。すなわち、 G と V は一価関数の関係にある。

【0007】このような状況において、被加工物を放電加工する際には、まず最初にパルス1回当たりの除去量 Q に応じた値を決定し、加工表面粗さを指定する。次に、単位時間当たりのパルスの発生回数を決定する。加工速度を指定することができるようになっているシステムが使い易いと言える。 Q を決定するには、 $I(t)$ と T_d を各々独立に制御できる方が望ましい。

【0008】しかしながら、 $I(t)$ の制御は周波数成分が高く帯域幅も広く、さらに扱う電力が数100Wと巨大であるので、現在の半導体技術でもリニアに制御することは極めて困難である。一方、 T_d の制御は100MHz周波数帯域においても回路技術としては困難ではないが、 $I(t)$ の正確な波形が検出できなければこの T_d だけ制御しても無意味である。

【0009】従来においては、 $I(t)$ が $0.01 \mu s$ のオーダーで変動するにもかかわらず、非常に長い時間（ $0.01s \sim 0.1s$ ）にわたって（パルス数にして数万～数十万パルス）平均化したものを放電電流信号として、放電ギャップを制御する運動機構の制御基準としており、放電ギャップ G の瞬時値は放電条件にとって適切でない場合が多く、加工上のロスタイムと表面粗さ

の質低下を招いていた。

【0010】本発明は、上記従来技術の有する課題に鑑みなされたものであり、その目的は、加工上のロスタイムをなくし、加工効率の向上と表面粗さの質向上を図ることができる放電加工機を提供することにある。

【0011】

【課題を解決するための手段】上記目的を達成するために、本発明は、パルス電圧を電極と被加工物間に印加して放電を生じさせ、前記被加工物を部分的に溶解させることで加工する放電加工機であって、時間とともに電圧が上昇するようなパルス電圧を供給するパルス電源と、放電電流を検出する放電電流検出手段と、放電開始以後の前記放電電流の時間積分値を算出し、前記時間積分値が所定値となるように前記パルス電源を制御する電圧制御手段とを有する。

【0012】ここで、本発明の放電加工機は、さらに、放電開始時間を検出する時間検出手段と、前記放電開始時間に基づいて前記電極と前記被加工物間の放電ギャップをフィードバック制御するギャップ制御手段とを有し、前記ギャップ制御手段は、前記放電開始時間が適正時間より短い場合には前記放電ギャップを広げ、前記放電開始時間が適正時間より長い場合には前記放電ギャップを狭めることが好適である。

【0013】また、本発明の放電加工機は、さらに、放電開始時の前記パルス電圧を検出するパルス電圧検出手段と、前記放電開始時の前記パルス電圧に基づいて前記電極と前記被加工物間の放電ギャップをフィードバック制御するギャップ制御手段とを有し、前記ギャップ制御手段は、前記放電開始時の前記パルス電圧が適正電圧より低い場合には前記放電ギャップを広げ、前記放電開始時の前記パルス電圧が適正電圧より高い場合には前記放電ギャップを狭めることが好適である。

【0014】また、本発明の放電加工機は、さらに、放電開始時間を検出する時間検出手段とを有し、前記電圧制御手段は、前記放電開始時間が所定しきい時間よりも短い場合に前記電極と前記被加工物の短絡状態を検出して前記パルス電圧の供給を停止することが好適である。

【0015】前記パルス電源は、放電パルスを出力するパルス電圧発生部と、前記放電パルスに電圧を重ねる高電圧重畳部とを有し、前記パルス電圧発生部は、前記時間積分値が所定値に達した時点で前記放電パルスの出力を停止し、前記高電圧重畳部は、前記放電パルスと同期して前記放電パルスに時間とともに上昇する電圧を重ねし、かつ、放電開始以後に前記重畳を停止することが好適である。

【0016】また、前記電圧制御手段は、加工速度指令に基づいて基準パルスを生成する基準パルス生成手段を備え、前記パルス電圧発生部は前記基準パルスに同期して前記放電パルスの出力を開始し、前記高電圧重畳部は前記基準パルスに同期して前記上昇する電圧の重畳を開

始することが好適である。

【0017】また、前記電圧制御手段は、前記放電電流を積分する積分器と、前記所定値と前記積分器出力とを比較する比較器とを更に備え、前記パルス電圧発生部は、前記積分器出力が前記所定値に達したことを示す前記比較器の出力によって前記放電パルスの出力を停止することが好適である。

【0018】また、前記電圧制御手段は、前記放電電流と所定しきい電流とを比較することにより放電を検出する放電検出手段を更に備え、前記高電圧重畳部は、前記放電検出手段の出力によって前記上昇する電圧の重畳を停止することが好適である。また、前記放電パルスの出力開始後、前記所定しきい時間以内に前記放電検出手段が放電を開始したことを検出した場合に、前記パルス電圧発生部は前記放電パルスの出力を直ちに停止し、前記高電圧重畳部は前記上昇する電圧の重畳を直ちに停止することが好適である。

【0019】本発明において、前記放電電流検出手段は、放電点近傍に配置することができる。

【0020】また、本発明において、前記放電電流検出手段は、前記電極によりその中心部が貫かれるように配置されたリング状の磁性体コアと、前記磁性体コアに巻回されたコイルとを有することができる。

【0021】前記磁性体コアには、前記電極を通すための間隙が形成されることが好適である。

【0022】また、本発明は、パルス電圧を電極と被加工物間に印加して放電を生じさせ、前記被加工物を部分的に溶解させることで加工する放電加工機における放電加工方法を提供する。この方法は、時間と共に電圧が上昇するようなパルス電圧の供給を開始するパルス電圧供給ステップと、放電開始を検出する放電開始検出ステップと、放電開始以後の放電電流を積分する放電電流積分ステップと、前記放電電流の積分結果を所定値と比較する積分結果比較ステップと、前記積分結果が前記所定値以上となった場合に、前記パルス電圧の供給を停止するパルス電圧停止ステップとを備える。

【0023】本発明の方法において、さらに、パルス電圧の供給を開始してから、放電開始までの放電開始時間を測定する放電開始時間測定ステップと、前記放電開始時間と適正時間とを比較する放電開始適正時間比較ステップと、前記放電開始時間が適正時間より短い場合には前記電極と前記被加工物間の放電ギャップを広げ、前記放電開始時間が適正時間より長い場合には前記放電ギャップを狭める時間比較放電ギャップ調節ステップとを備えることが好適である。

【0024】また、本発明の方法において、さらに、放電開始時の前記パルス電圧を測定するパルス電圧測定ステップと、前記放電開始時の前記パルス電圧と適正電圧とを比較するパルス電圧適正電圧比較ステップと、前記放電開始時の前記パルス電圧が前記適正電圧より低い場

合には前記電極と前記被加工物間の放電ギャップを広げ、前記放電開始時の前記パルス電圧が前記適正電圧より高い場合には前記放電ギャップを狭める電圧比較放電ギャップ調節ステップとを備えることが好適である。

【0025】また、本発明の方法において、さらに、パルス電圧の供給を開始してから、放電開始までの放電開始時間を測定する放電開始時間測定ステップと、前記放電開始時間と所定しきい時間とを比較する所定しきい時間比較ステップとを備え、前記放電開始時間が所定しきい時間よりも短い場合に前記電極と前記被加工物の短絡状態を検出して前記パルス電圧停止ステップにおいて前記パルス電圧の供給を停止することが好適である。

【0026】前記パルス電圧供給ステップは、さらに、放電パルスを出力する放電パルス出力ステップと、前記放電パルスに電圧を重畳する高電圧重畳ステップとを含み、前記高電圧重畳ステップは、前記放電パルスと同期して前記放電パルスに時間とともに上昇する電圧を重畳し、かつ、前記放電開始検出ステップにおいて放電を開始したことを検出した時点で前記重畳を停止することができる。

【0027】前記パルス電圧供給ステップは、さらに、加工速度指令に基づいて基準パルスを生成する基準パルス生成ステップを備え、前記放電パルス出力ステップは前記基準パルスに同期して前記放電パルスの出力を開始し、前記高電圧重畳ステップは前記基準パルスに同期して前記上昇する電圧の重畳を開始することができる。

【0028】本発明においては、放電電流 $I(t)$ の値は制御せず、放電電流検出手段により $I(t)$ の時間波形を正確に検出し、この放電電流を時間積分して放電持続時間 T を

【数 2】

$$Q = \int_0^T I(t) dt$$

となるように電圧制御手段で制御する。これにより、1パルス当たりの除去量に対応して定まる表面粗さを制御することができる。放電ギャップが適正值でない場合には、所定電圧値を有するパルス電圧を印加しても放電が生じない場合もあるが、本発明では時間とともに電圧が上昇するようなパルス電圧を用いているため、放電ギャップが適正值でなくてもいずれかの時点で放電を生じさせることができ、放電の不発を確実に防止して加工効率を上げることができる。

【0029】放電ギャップが適正值でなく、適正值に比べて広狭がある場合、この広狭は放電開始時間の相違となって顕在化する。すなわち、適正值に比べて放電ギャップが広い場合には放電開始時間が長くなり、逆に適正值に比べて放電ギャップが見狭い場合には放電開始時間が短くなる。そこで、放電開始時間を検出し、この放電開始時間に基づいて放電ギャップをフィードバック制御

することで、放電ギャップを適正值に収斂させることができる。フィードバック制御は、具体的には放電開始時間が長い場合には放電ギャップを狭くし、放電開始時間が短い場合には放電ギャップを広くするように行われる。

【0030】放電ギャップが極端に短く電極と被加工物が短絡状態にある場合、パルス電圧を印加すると直ちに電流が流れ始める。そこで、放電開始時間を検出して所定しきい時間と比較し、所定しきい時間より短い場合には短絡状態にあると判定できる。そして、短絡状態にあると判定された場合には直ちにパルス電圧の供給を停止することで、短絡状態における被加工物へのダメージを抑制することができる。短絡状態では、当然ながら放電開始時間は適正時間より短くなるので、この場合にも放電ギャップを広げる方向にフィードバック制御され、短絡状態が速やかに解消される。

【0031】時間とともに上昇するパルス電圧は、一定値を有する放電パルスに時間とともに上昇する電圧を重ねることによって得ることができる。時間とともに上昇する電圧は放電パルスに同期して、すなわち放電パルスの立ち上がりタイミングと同一タイミングで重ねることが好ましく、放電が開始された後は放電パルスのみで放電を維持することができ、かつ放電電流の値を所望値に制御するために放電開始以後は重ねを停止することが好適である。

【0032】放電パルスと重畳パルスを同期させるためには、放電パルスと重畳パルスを同一基準クロックでセットされる2つのフリップフロップで生成することが好適である。これにより、放電パルスと重畳パルスの立ち上がりタイミングを容易に一致させることができる。また、放電パルスは放電電流の時間積分値が所定値、すなわちQ値に達した場合に解除する必要がある。そこで、放電パルスをフリップフロップから出力する場合には放電電流の時間積分値がQ値に達した時点でこのフリップフロップにリセット信号を供給することで、放電パルスを容易に解除することができる。一方、重畳パルスの停止に関しても、放電が開始された以後にフリップフロップにリセット信号を出力することで容易に重ねを停止することができる。なお、放電が開始されたか否かは、放電電流が所定しきい電流を超えたか否かで判定することができる。

【0033】本発明においては、放電電流の時間積分値に基づいて放電パルスの印加を制御する。したがって、放電電流を遅れなく検出することが要求される。リアルタイムで放電電流を検出するためには、放電点の近傍に放電電流検出手段を配置することが好適である。時間的位相差の発生を排除するためである。放電点の近傍に配置するためには、例えば電極により貫かれる磁性体コアとコイルで放電電流検出手段を構成するのが好適である。放電電流によりコイルに電圧が誘起され、この誘起

電圧を放電電流波形として検出することで、配線の分布インダクタンスによらず放電点における放電電流のパルス波形を忠実に検出することができる。

【0034】

【発明の実施の形態】以下、図面に基づき本発明の実施形態について説明する。

【0035】図1には、本実施形態の放電加工機の構成図が示されている。直流電源10は商用電源を整流し、2種類の直流を供給する。1つは50V程度あるいは100V程度の比較的低い電圧+LVで大電流を供給する放電用、もう1つは250V程度の比較的高い電圧+HV及び低電圧+LVは給電ケーブル12を介してパルス発生用の半導体等の能動的電子素子からなる放電パルス電源14に供給される。

【0036】放電パルス電源14はフィルタ14a、パルス電圧発生部14b及び高電圧重畳部14cの3つの部分から構成される。フィルタ14aは直流電源10を受ける受電側に設けられ、高周波成分の空間放射を抑制するためのチョークコイルと平滑コンデンサを有する。パルス発生電圧部14bは、半導体素子(図ではMOSFET)により直流低電圧+LVを放電加工パルスに変調する。具体的には、半導体素子のゲートをパルスで駆動することでソース・ドレイン間を順次OFF、ON、OFFさせスイッチングする。ゲートは、絶縁式高周波整合回路40を介して放電パルス幅制御器38に接続され、この放電パルス幅制御器38からの放電指令パルスによりスイッチング制御される。高電圧重畳部14cはパルス電圧発生部14bのゲートドライブ信号、すなわち放電指令パルスと同期し同スタートタイミングで電圧を一定傾斜で上昇させ、その電圧を低電圧+LV(逆電流防止ダイオード14dのカソード側)に重畳させる。これにより、放電ギャップGの広狭にかかわらず(放電ギャップGが最適値に設定されていなくても)、確実に放電を開始させる。なお、フィルタ14aの低電圧+LV出力側には逆流防止ダイオード14dが接続される。但し、加工条件によっては逆極性に接続されることもある。

【0037】パルス電源発生部14により発生した短い立ち上がり時間の放電加工パルスは+側リード線16、ブラシ18を介してスピンドル20に取り付けられたチャック22で保持される回転電極24側に供給される。また、パルス電圧発生部14bの-側はリード線30を介して被加工物28に接続される。

【0038】被加工物28はY軸位置決め装置32及びX軸位置決め装置34によりXY平面内で移動自在に保持される。また、スピンドル20はZ軸位置決め装置36によりZ軸方向(XY平面に対して垂直方向)に移動自在に保持される。なお、スピンドル20の回転軸は加工する形状により一定速度で回転する場合もあれば、角

11

度を割り出しながら被加工物 28 との相対運動を維持して加工形状を作り出す場合もある。これら位置決め装置 32、34、36 により、回転電極 24 と被加工物 28 との相対的位置関係を規定することができる。特に、Z 軸位置決め装置 36 により放電ギャップ G が調整され、回転電極 24 を被加工物 28 に近づけ放電ギャップ G が所定値以下となると放電が発生する。3 軸の位置決め装置 32、34、36 は放電パルス幅制御器 38 からの位置決め指令により駆動される。

【0039】また、放電点の近傍には放電電流をリアルタイムでモニタするための放電電流検出器 26 が配置される。放電電流検出器 26 は可能な限り放電点の近傍に配置するのが好ましい。放電電流検出器 26 で検出された放電電流 $I(t)$ は放電パルス幅制御器 38 に供給される。放電パルス幅制御器 38 は、検出された放電電流 $I(t)$ に基づいてパルス電圧発生部 14b を駆動する放電指令パルス並びに高電圧重畳部 14c を駆動するランプ信号を出力する。

【0040】図 2 には、放電パルス幅制御器 38 の回路図が示されている。加工速度指令が入力されると、加工速度指令値は A/D 変換器 38p にてデジタルデータに変換され、デジタルデータ J としてレートマルチプライヤ 38c に供給される。n ビットのレートマルチプライヤ 38c では、内部クロックを $J/2^n$ 倍し、周期 $J \cdot f/2^n$ の出力パルスを基準パルスとして生成する。レートマルチプライヤ 38c の出力パルスはフリップフロップ (F/F) 38i 及び 38j のセット端子 S に供給されてこれらをセットする。

【0041】また、内部設定されるサンプリング時間間隔指令は A/D 変換器 38n にてデジタルデータに変換され、デジタルデータ S としてレートマルチプライヤ 38b に供給される。レートマルチプライヤ 38b では、内部クロックを $S/2^n$ 倍し、周期 $S \cdot f/2^n$ の出力パルスを生成する。レートマルチプライヤ 38b の出力パルスは AND ゲート 38d を介してサンプリングパルスとなり、A/D 変換器 38a のスタート信号となる。

【0042】そして、放電電流検出器 26 から供給された放電電流 $I(t)$ は、A/D 変換器 38a でデジタルデータに変換され、積分器のフルアダー 38e の一方に供給される。フルアダー 38e の出力は次段の積算レジスタ 38f の入力に接続されており、積算レジスタ 38f の出力はフルアダー 38e の他方に接続されている。したがって、AND ゲート 38d からサンプリングパルスが与えられる度に A/D 変換器 38a の出力が積算レジスタ 38f に積算され、積算レジスタ 38f の出力は放電電流 $I(t)$ を時間積分した値 $\int I(t) dt$ となる。積算レジスタ 38f の出力はデジタルコンパレータ 38g の一方に供給される。デジタルコンパレータ 38g の他方には、入力された加工粗さ指令値を A/D 変換器 38r でデジタルデータに変換して得られる Q 値が供

12

給され、放電電流の積分値と Q 値が大小比較される。そして、放電電流の積分値が Q 値以上となった時点、すなわち $Q \leq \int I(t) dt$ (但し時間積分区間は 0~T) となった時点でデジタルコンパレータ 38g はリセット信号を出力する。リセット信号は OR ゲート 38h を介してフリップフロップ (F/F) 38i のリセット端子 R に供給され、F/F 38i をリセットする。F/F 38i のセット端子にはレートマルチプライヤ 38c からの $J \cdot f/2^n$ のパルス信号が供給されるから、このパルス信号で放電指令パルスはセットされ、OR ゲートからのリセット信号により解除されることになる。すなわち、 $\int I(t)$ の時間積分値が Q 値に達すると、放電指令パルスが解除され、放電パルスが出力されなくなる。また、OR ゲート 38h からのリセット信号は積分レジスタ 38f にも供給され、積分レジスタ 38f をリセットして $\int I(t)$ の積分値を 0 にクリアする。なお、F/F 38i からの出力は AND ゲート 38d にも供給され、これにより AND ゲート 38d が閉じてレートマルチプライヤ 38b からの $S \cdot f/2^n$ のパルスは A/D 変換器 38a に入力されなくなる。

【0043】また、レートマルチプライヤ 38c からの $J \cdot f/2^n$ のパルスは F/F 38j のセット端子 S にも供給され、F/F 38j の出力は次段のアナログ時間積分器 38k に接続され、放電指令パルスと同期して立ち上がり、一定の傾斜で上昇するランプ信号として出力される。ランプ信号は、放電ギャップの値にかかわらず放電を確実に起こさせるためのものであるから、実際に放電が生じた時点で速やかに解除される必要がある。放電の開始は、放電電流 $I(t)$ がしきい値 I_p を超えたか否かで判定することができる。そこで、図 2 に示されるように、放電電流検出器 26 で検出された放電電流 $I(t)$ をアナログコンパレータ 38q に供給して所定のしきい値 I_p と比較し、放電電流 $I(t)$ が I_p を超えた時点でアナログコンパレータ 38q から F/F 38j 及びアナログ時間積分器 38k にリセット信号を出力する。これにより、ランプ信号は放電が生じた時点で解除されることになる。なお、アナログ時間積分器 38k がランプ動作、すなわち放電指令パルスと同期した一定の傾斜を有するパルス信号を出力する動作を行っている間、すなわち放電開始前は、放電電流 $I(t)$ の時間積分を行うべきではないので、F/F 38j の反転出力を AND ゲート 38d に供給し、ランプ信号が出力されている間はスタート信号である $S \cdot f/2^n$ のパルス信号の A/D 変換器 38a への供給を禁止している。これにより、放電電流 $I(t)$ の時間積分はランプ動作の終了後行われることになる。

【0044】また、放電ギャップ G が狭すぎて短絡状態にある場合には、ランプ動作の継続時間 T_r が無いか、あるいは極端に短くなる。短絡状態において放電を開始させることは好ましくないため、放電指令パルスを速や

かに解除する必要がある。タイマ38mは、レートマルチプライヤ38cからの $J \cdot f / 2^n$ パルスによってセットされ、プリセットされた所定の時間内だけ正論理“H”が出力されている。もし、この時間内にフリップフロップ38jが、 $I(t)$ が I_p を超えることによってリセットされる場合は、ANDゲート38sを通してORゲート38hに信号を出力し、 $F/F38i$ をリセットして放電指令パルスをランプ信号解除後に速やかに解除する。

【0045】一方、放電ギャップGが広すぎて放電がなかなか生じない場合には、放電ギャップを小さくする必要がある。そこで、アナログ時間積分器38kからのランプ信号をアナログコンパレータ38tに供給し、適正電圧と比較することでランプ動作の継続時間と適正放電ギャップにおけるランプ継続時間との大小関係を判定する。アナログコンパレータ38tはホールド回路を含んでおり、アナログコンパレータ38qの出力信号の立上り（論理“L”から論理“H”への切り替わり時点＝放電開始時点）で、アナログ時間積分器38kの出力（ランプ信号）をホールドする。その後、時間Tdが経過して放電が終了すると、アナログコンパレータ38qの出力信号が論理“L”に戻り、その時点でアナログコンパレータ38t内部の比較器はホールド回路にホールドされたランプ信号と適正電圧との比較を行い、その結果を正負論理符号（論理“H”又は論理“L”）としてZ軸位置決め装置36に供給する。つまり、アナログコンパレータ38tは放電開始時のランプ信号と適正電圧との比較の結果によって、ランプ継続時間が長すぎる場合（つまり、ランプ信号が適正電圧よりも大きくなってから放電が始まる場合。）には、放電ギャップGが広すぎるので、放電ギャップGを狭め、容易に放電開始できるようにする。逆の場合（つまり、ランプ信号が適正電圧よりも小さいうちに放電が始まる場合。）には放電ギャップGを広げ、放電ギャップGが最適値となるようにフィードバック制御する。

【0046】後述する図3の例では、ランプ電圧と適正電圧との電圧比較の結果からZ軸位置決め装置36に供給する信号を生成しているが、このランプ電圧は、時間の経過と共に増加していく電圧であるから、電圧比較を行う代りに、別の実施形態として、時間比較を行うことによって可能である。つまり放電指令パルスが $F/F38i$ から出力された時刻から、放電が開始した時刻までの放電開始時間（ランプ信号の経過時間： T_{r1} ）を図示しない時間検出手段によって検出し、これと適正時間 T_{r2} との比較を行っても良い。

【0047】図3～図6には、本実施形態のタイミングチャートが示されている。ここで、 T_{r1} はランプ信号の継続時間、 T_{r2} は適正な放電ギャップにおけるランプ継続時間、 T_{r0} は短絡状態を判定するための極めて短い時間である。

【0048】図3はランプ信号の継続時間 T_{r1} が適正時間 T_{r2} を超えている場合（ $T_{r1} > T_{r2}$ ）、つまり放電ギャップGが広すぎる場合の例である。（A）は放電指令パルスのタイミングチャートであり、 $F/F38i$ から出力されてパルス電圧発生部14b内のMOSトランジスタのゲートに印加される。（B）はランプ信号により高電圧が重畳された加工パルスのタイミングチャートである。ランプ信号はアナログ時間積分器38kから高電圧重畳部14cのトランジスタのベースに印加され、+LVから+HVまで一定の傾斜で上昇していく電圧を生成する。（C）は放電電流 $I(t)$ のタイミングチャートであり、電圧が上昇していくとある時点で回転電極24と被加工物26間で放電が発生し、しきい値 I_p を超える。放電電流 $I(t)$ がしきい値 I_p を超えるとランプ信号がリセットされ、放電電流 $I(t)$ の時間積分が開始される。 T_{r1} はランプ信号の継続時間であるが、これは放電指令パルスが立ち上がってから実際に放電が生じるまでの時間に他ならない。一旦放電が開始すると放電ギャップGに印加される電圧は極めて低くなるので、この時点でランプ信号を解除して重畳電圧を0Vとし、つまり放電電圧を+LVに落としても放電の持続には影響なく、放電電流 $I(t)$ にもほとんど影響を与えない。すなわち、ランプ信号及び高電圧重畳部14cは放電トリガとして機能し、放電開始後はパルス電圧発生部14bによって放電電圧が供給される。そして、放電電流の積分値が所定値Qに達すると、 $F/F38i$ がリセットされて放電指令パルスが解除される。

（D）は放電ギャップGの変化を示すタイミングチャートであり、 T_{r1} と T_{r2} を比較した結果、 $T_{r1} > T_{r2}$ であると判定されるので、コンパレータ38tからZ軸位置決め装置36に対してフィードバック制御信号が出力され、放電ギャップGを狭める方向に駆動する。図において、放電ギャップGが過大ギャップから適正ギャップに変化しているのはこのことを示している。図4はランプ信号の継続時間 T_{r1} 、すなわち放電開始時間 T_{r1} が所定時間 T_{r0} よりも短く、回転電極24と被加工物26が短絡状態にある場合の例である。（A）は放電指令パルス、（B）は加工パルス電圧、（C）は放電電流、（D）は放電ギャップGのタイミングチャートである。ランプ信号により高電圧+HVを重畳した加工パルスを印可すると、短絡状態にあるため極めて短時間（ $T_{r1} < T_{r0}$ ）に放電が生じ、放電電流 $I(t)$ がしきい値 I_p を超える。したがって、極めて短時間にランプ信号が解除される。プリセットタイマ38mは、レートマルチプライヤ38cからの $J \cdot f / 2^n$ パルスによってセットされ、 T_{r0} までは正論理“H”が出力される。この間に放電電流 $I(t)$ がしきい値 I_p を超えてランプ信号が解除されると $F/F38j$ の反転出力が正論理“H”となるからANDゲート38sが開放し、このANDゲート38sからのリセット信号により

F/F38i がリセットされ、放電指令パルスもほぼ T_{r1} 時間で解除される。すなわち、放電電流の時間積分値が Q 値に至る前に放電指令パルスは解除されて放電加工が中止される。 T_{r1} は当然ながら T_{r2} より短いので、コンパレータ 38t から Z 軸位置決め装置 36 にフィードバック制御信号が供給され、放電ギャップ G を広げるように制御される。この場合、短絡により被加工物 28 に与えるダメージは $\int I(t) dt$ (但し、時間積分区間は $0 \sim T_s$ で、 T_s は加工パルスの印加時間) となり、Z 軸位置決め装置 36 が短絡状態を抜け出すのに要する時間内に発生するパルス数を乗じたとしても、このようなパルス解除機能を有しない場合に比べてダメージを非常に小さくすることができる。

【0049】図 5 はランプ信号の継続時間、すなわち放電開始時間 T_{r1} が短絡状態判定時間 T_{r0} よりも長く、所定時間 T_{r2} よりも短い場合の例である。(A) は放電指令パルス、(B) は加工パルス電圧、(C) は放電電流、(D) は放電ギャップ G のタイミングチャートである。放電指令パルスに同期して加工パルスが立ち上がり、一定の傾斜で電圧が $+L V$ から $+H V$ に向けて上昇していく。この過程で放電が開始し、放電電流 $I(t)$ がしきい値 I_p を超える。すると、ランプ信号が解除されて加工パルス電圧は $+L V$ まで低下し、放電電流 $I(t)$ の時間積分が開始される。放電電流 $I(t)$ の時間積分値が所定値 Q に達すると、放電指令パルスが解除され、放電が停止する。放電開始時間 T_{r1} が T_{r2} より短いので、コンパレータ 38t から Z 軸位置決め装置 36 に対して放電ギャップ G を増大させる方向のフィードバック制御信号が供給され、放電ギャップ G は適正値に収収していく。

【0050】図 6 はランプ信号の継続時間、すなわち放電開始時間 T_{r1} が適正時間 T_{r2} にほぼ等しい場合の例である。(A) は放電指令パルス、(B) は加工パルス電圧、(C) は放電電流、(D) は放電ギャップ G のタイミングチャートである。放電指令パルスに同期して加工パルスが立ち上がり、一定の傾斜で電圧が $+L V$ から $+H V$ に向けて上昇していく。この過程で放電が開始し、放電電流 $I(t)$ がしきい値 I_p を超える。すると、ランプ信号が解除されて加工パルス電圧は $+L V$ まで低下し、放電電流 $I(t)$ の時間積分が開始される。放電電流 $I(t)$ の時間積分値が所定値 Q に達すると、放電指令パルスが解除され、放電が停止する。放電開始時間 T_{r1} が適正時間 T_{r2} にほぼ等しいので、コンパレータ 38t からはフィードバック制御信号が出力されず、Z 軸位置決め装置 36 は現在の放電ギャップ G を維持する。

【0051】このように、ランプ信号により一定傾斜で高電圧を印加して加工パルスを印加するので放電ギャップの広狭によらず確実に放電を生じさせることができる。そして、放電が開始された場合には放電電流の時間

積分値をモニタし、放電電流の時間積分値が Q 値、すなわちパルス 1 回当たりの除去量に達した場合に速やかに加工パルスを解除することで高精度の加工が可能となる。さらに、加工パルス印加から放電開始時間をモニタし、適正時間より短い場合には放電ギャップを広げ、適正時間より長い場合には放電ギャップを狭めるようにフィードバック制御することで、放電ギャップを放電に最適な間隔に制御することができる。

【0052】なお、本実施形態においては、放電電流をリアルタイムで検出し、この時間積分値に基づいて放電パルスを制御しているので、放電電流を応答性良く検出することが必要である。

【0053】図 7 には、放電電流検出器 26 の構成が示されている。放電電流検出器は、リング状の磁性体コア 26a と、このコアに巻回されたコイル 26b を含んで構成される。回転電極 24 に放電電流が流れると、コイル 26b には放電電流による誘起電圧が生じ、これにより放電電流波形を検出することができる。リング状の磁性体コア 26a は絶縁処理された微細鉄粉末で作製され、高周波パルス電流が流れても渦電流が発生せず、周波数応答に優れている。また、エネルギーロスがないので空間的体積を小さくしても発熱は極めて小さい。磁性体コア 26a はその中心が回転電極 24 に貫通されるように配置され、これにより放電点の近傍に配置することができる。パルス電流は高速に変化するため、磁性体コア 26a は放電点の近傍に配置する必要がある。例えば放電電流検出器 26 を + 側リード線 16 の端子付近に配置すると、リード線 16 の分布インダクタンスにより放電点における電流との間に時間的位相差が生じ、放電点での正確な電流波形を検出することができなくなるからである。放電電流検出手段 26 の空間的体積を小さくすることで、放電点の極く近傍に容易に配置することができる。

【0054】なお、ワイヤ状電極の場合には、ワイヤをリング状の磁性体コア 26a に通すのが困難となる場合もある。そこで、図 8 に示されるように磁性体コア 26a の一部に間隙を形成し、ワイヤを通し易くするのが好適である。ワイヤの直径を 0.2 mm、間隙の幅を 0.25 mm 程度とすれば、電磁結合にほとんど影響がない。

【0055】磁性体コア 26a 及びコイル 26b で検出された放電電流 $I(t)$ は、図 9 に示されるように同軸ケーブル 26c により放電パルス幅制御器 38 に供給され、既述したようにパルス電圧発生部 14b と高電圧重畳部 14c の制御に用いられる。また、Z 軸位置決め装置 36 などの運動機構へフィードバックされる。

【0056】図 10 と図 11 は本発明による放電加工機における放電加工方法の実施形態を示す。図 10 において、S10 において処理を開始し、S20 において時間と共に電圧が上昇するようなパルス電圧の供給を開始す

る。S30では時間と共に電圧が上昇するパルス電圧が供給された結果、電極と被加工物間の絶縁が破られるまでパルス電圧が上昇して放電が開始したことを検出する。S40では、パルス電圧の供給を開始してから、前記の放電が開始するまでの時間を測定し、S50において、この放電開始時間と、適正な放電ギャップによって決まる適正時間との比較を行い、その結果、S60において、前記放電開始時間が適正時間より短い場合には適正なパルス電圧値よりも低い電圧値で放電が開始したことから、前記電極と前記被加工物間の放電ギャップが狭すぎると判断してこれを広げ、前記放電開始時間が適正時間より長い場合には逆に前記放電ギャップが広すぎると判断してこれを狭める。これらのS40、S50、S60の処理は、これに代えてS41、S51、S61の処理を行うことができる。即ち、S41においては、放電開始時のパルス電圧を測定する。このパルス電圧測定は、電極に印加される電圧を測定しても良いが、通常は高電圧のため、測定が容易ではない。その場合には、電極電圧の測定に代えて図2におけるランプ信号を測定しても良い。S51では、このようにして測定された放電開始時のパルス電圧（又はランプ信号）と放電適正電圧（あるいはそれに相当するランプ信号電圧）との比較を行う。その結果、S61において前記放電開始時の前記パルス電圧が前記適正電圧より低い場合には前記電極と前記被加工物間の放電ギャップを広げ、前記放電開始時の前記パルス電圧が前記適正電圧より高い場合には前記放電ギャップを狭める。次にS70では、パルス電圧の供給を開始してから、放電開始までの放電開始時間と、微少な所定しきい時間との比較を行ない、その結果を変数へ格納しておく。電極と被加工物間が短絡している場合は、パルス電圧印加直後の適正な電圧まで上昇する前に、直ちに電流が流れ始めるため、この微少な所定しきい時間以前に電流が流れはじめたことから短絡を検出する。次に、S80では、放電開始後の放電電流の時間に対する積分を行う。S90では前記の放電電流の積分値と、1パルス当たりの除去量に対応して定まる所定値と比較を行い、S100において、前記積分結果が前記所定値以上となった場合に、前記パルス電圧の供給を停止する。又、このパルス電圧は、S70において変数に格納された比較結果（短絡検出結果）から短絡を検出した場合にも直ちにパルス電圧の供給を停止する。

【0057】このように放電加工用のパルス電圧を供給

【図8】



し、S110において加工完了が判断されるとS120において処理を終了する。加工が完了していない場合は、S20へ処理を戻して、パルス電圧を繰り返し供給する。

【0058】図11は前記S20におけるパルス電圧の供給手順を更に詳細に説明した図で、S20から開始する。S21は加工速度指令に基づいて放電パルス間隔を決めるための基準パルスを生成する。S21はこの基準パルスに同期して放電パルスの供給を開始し、S22ではこの放電パルスに対して更に時間と共に増加する電圧を重ねる。この重ねに際しては、前記放電パルスと同期してこの放電パルスに時間とともに上昇する電圧を重ねし、かつ、S30において放電を開始したことを検出した時点で前記重畳を停止する。

【0059】

【発明の効果】以上説明したように、本発明によれば、加工上のロスタイムをなくし、加工効率の向上と表面粗さの質向上を図ることができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明の実施形態の全体構成図である。

【図2】 図1における放電パルス幅制御器の構成図である。

【図3】 他の実施形態のタイミングチャート（ $Tr1 > Tr2$ の場合）である。

【図4】 他の実施形態のタイミングチャート（ $Tr1 < Tr0$ の場合）である。

【図5】 他の実施形態のタイミングチャート（ $Tr0 < Tr1 < Tr2$ の場合）である。

【図6】 他の実施形態のタイミングチャート（ $Tr1 = Tr2$ の場合）である。

【図7】 図1における放電電流検出手段の構成図である。

【図8】 図7における磁性体コアの構成図である。

【図9】 図1における放電電流検出手段の他の構成図である。

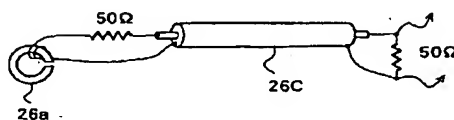
【図10】 更に他の実施形態のフローチャートである。

【図11】 図10の一部詳細フローチャートである。

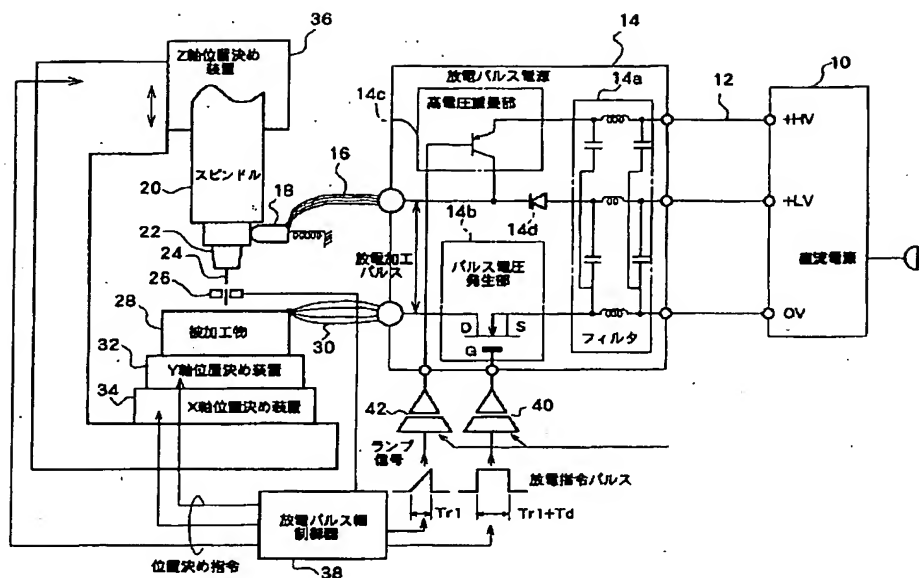
【符号の説明】

14 放電パルス電源、24 回転電極、26 放電電流検出器、28 被加工物、38 放電パルス幅制御器。

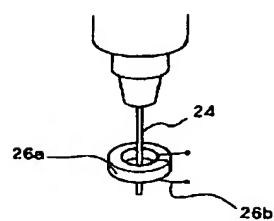
【図9】



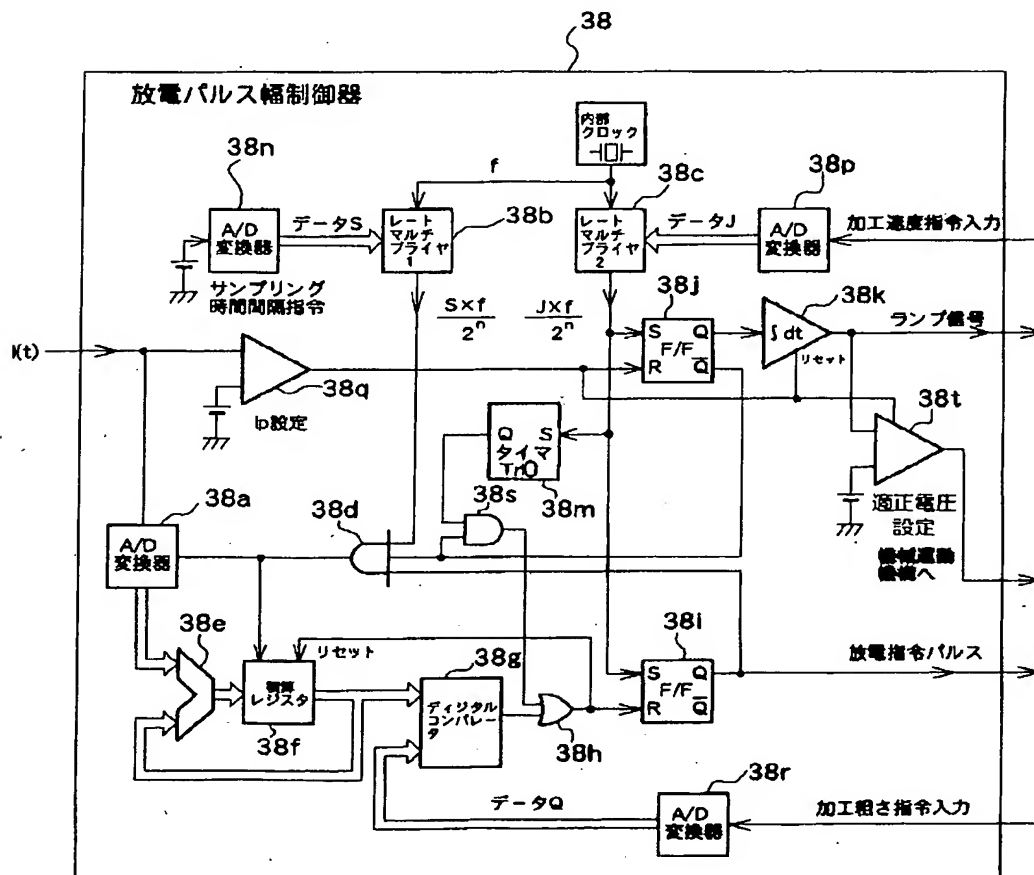
【図1】



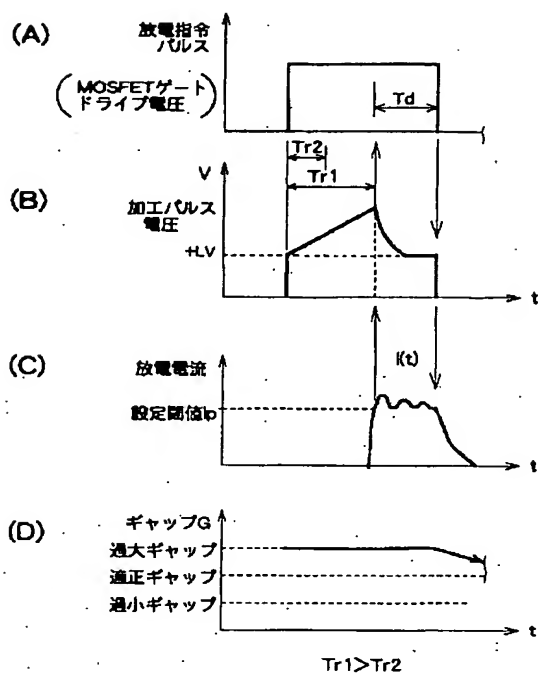
【図7】



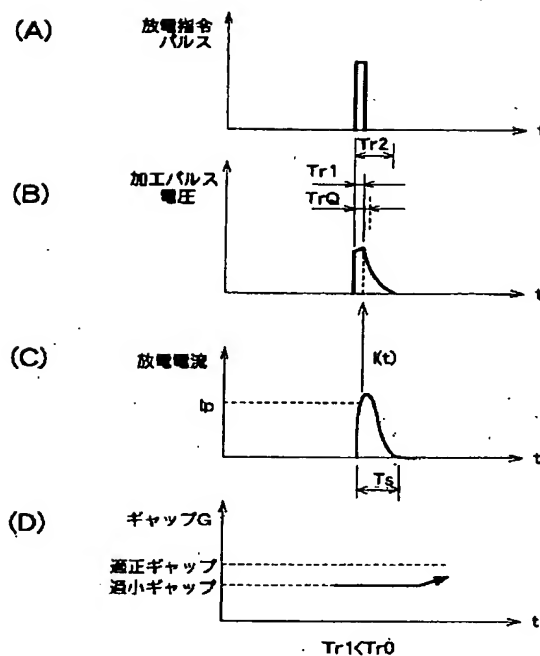
【図2】



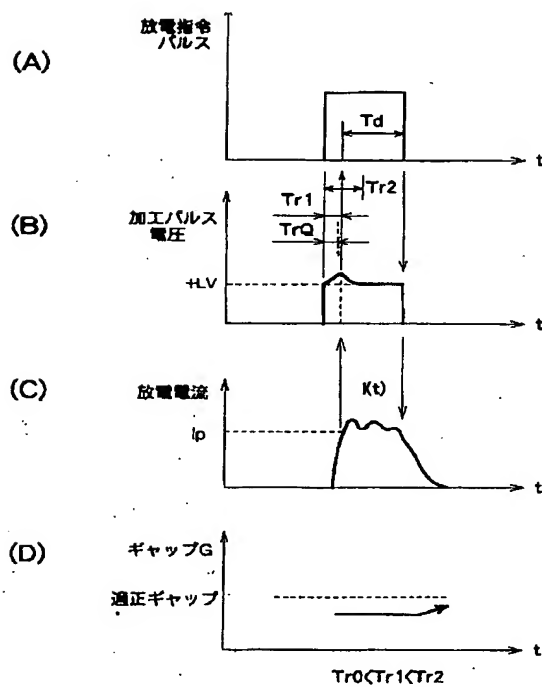
【図3】



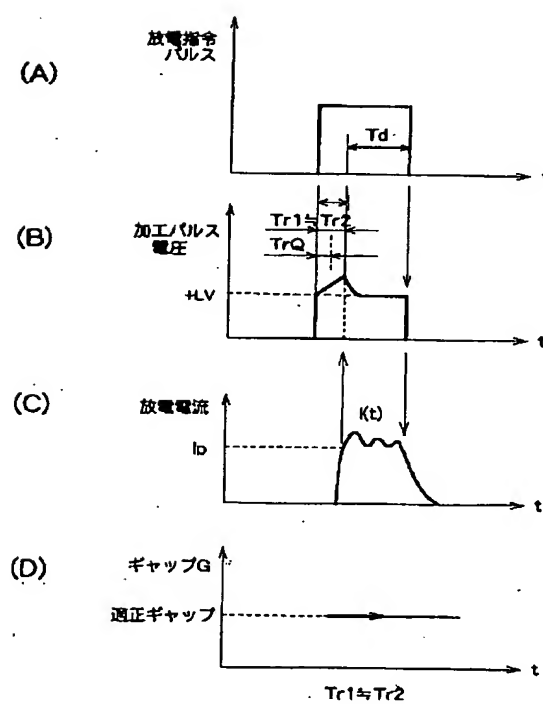
【図4】



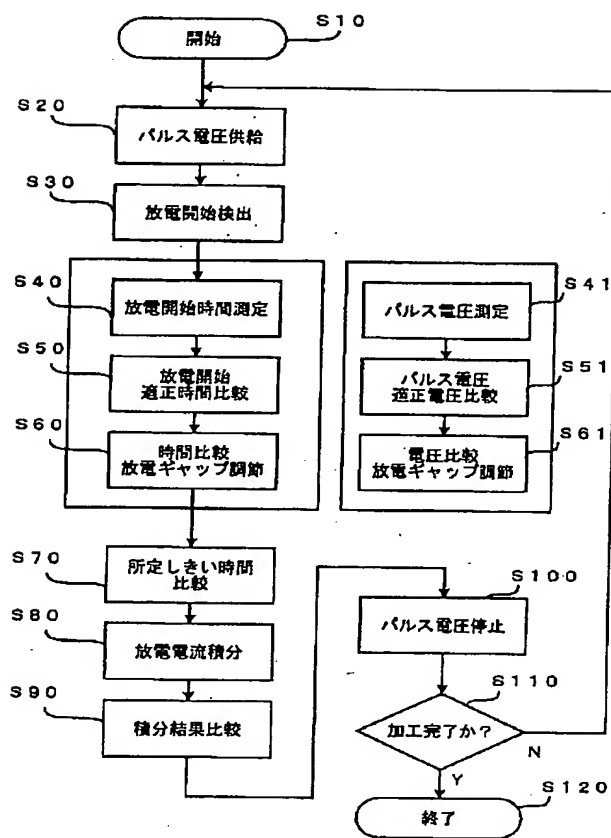
【図5】



【図6】



【図10】



【図11】

